

Testbed ADRENALINE+: Aprovechamiento de conexiones Ethernet con QoS sobre redes de conmutación ópticas transparentes dinámicamente reconfigurables mediante GMPLS

R. Muñoz, R. Martínez, C. Pinart, R. Casellas, F. Galán, I. Martínez, G. Junyent
Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC)

Parc Mediterrani de la Tecnologia, Av. Canal Olímpic S/N, 08860 Castelldefels (Barcelona)

Tel: 936 452 916, Fax: 936 452 901

E-mail: {raul.munoz, ricardo.martinez, carolina.pinart, ramon.casellas, fermin.galan, ivan.martinez, gabriel.junyent}@cttc.es

Resumen

La evolución de las tecnologías ópticas, como los avances en nodos R-OADMs y OXCs, permiten el paso de comunicaciones ópticas punto a punto a redes de transporte ópticas transparentes, proporcionando canales ópticos de extremo a extremo reconfigurables sin conversión Óptica-Electro-Óptica (OEO). Mediante un plano de control GMPLS se puede introducir inteligencia en términos de aprovisionamiento y protección dinámica y en tiempo real de canales ópticos. En la actualidad no existen redes ópticas transparentes basadas en GMPLS desplegadas a nivel comercial, estando sólo disponibles en demostradores de laboratorios de I+D tales como el testbed ADRENALINE del CTTC. Este artículo presenta la arquitectura del testbed ADRENALINE, los principales experimentos de I+D realizados, así como la evolución del testbed hacia ADRENALINE+.

1. Introducción

El gran incremento y diversidad del tráfico IP, transportado actualmente en su mayoría sobre una infraestructura basada principalmente en la Jerarquía Digital Síncrona (SDH), ha impulsado la investigación y el desarrollo de arquitecturas de red más flexibles y escalables. La *multiplexación densa en longitud de onda* (DWDM) suministra una gran capacidad de transmisión, permitiendo el transporte, en una misma fibra, de decenas de longitudes. Sin embargo, la evolución de las tecnologías ópticas [1], como los *multiplexores ópticos de inserción y extracción reconfigurables* (R-OADM), los *nodos de conmutación ópticos* (OXC) y los láseres ópticos sintonizables, permiten el paso de comunicaciones ópticas DWDM punto a punto entre cada par de nodos, a redes ópticas transparentes (sin conversión opto-electrónica) que proporcionan servicios de conectividad mediante canales ópticos de extremo a extremo de gran capacidad y reconfigurables. [2]. Los R-OADM permiten insertar y extraer de forma totalmente óptica longitudes de onda DWDM de una fibra, mientras que los OXCs permiten conmutar ópticamente longitudes de onda de diferentes fibras.

La introducción del automatismo o inteligencia en redes ópticas transparentes se puede realizar mediante un plano de control IP [3] basado en la arquitectura de protocolos *Generalized Multi-Protocol Label Switching* (GMPLS) [4], estandarizado por la *Internet Engineering Task Force* (IETF) en 2004. El plano de control óptico representa un conjunto común de funciones y de mecanismos de señalización y enrutamiento para establecer dinámicamente conexiones ópticas (i.e., canales ópticos) con el nivel requerido de calidad de servicio (QoS), así como protección/restauración dinámica de canales ópticos en servicio frente a

fallos o degradaciones de la señal óptica. En el contexto de un plano de control distribuido, cada nodo óptico dispone de un controlador (e.g., un PC o un microprocesador) con una base de datos con información sobre el estado de la topología (e.g., número de enlaces ópticos y longitudes de onda disponibles por enlace) y los recursos del nodo (e.g., longitudes de onda libres en los enlaces ópticos) que le permite tomar sus propias decisiones (algoritmos) de aprovisionamiento y protección/restauración de canales ópticos. La información de la que dispone cada nodo puede ser diseminada mediante protocolos de enrutamiento, como *Open Shortest Path First-Traffic Engineering* (OSPF-TE) [5], lo que permite que cada nodo disponga de una base de datos con información global sobre la topología y los recursos ópticos en la red. Con el fin de establecer un canal óptico, los nodos ópticos requieren de un protocolo de señalización, como *Resource Reservation Protocol-Traffic Engineering* (RSVP-TE) [6], que permita el intercambio de información entre nodos y la reserva de los recursos a lo largo del camino entre el par de nodos origen-destino.

En la actualidad no existen redes ópticas transparentes basadas en GMPLS desplegadas a nivel comercial. Es una tecnología que sólo está disponible en laboratorios de I+D como, por ejemplo, el testbed ADRENALINE (All-optical Dynamic RELiable Network hAndLING IP/Ethernet Gigabit traffic with QoS) [7] desarrollado por el Centre Tecnològic de Telecomunicacions de Catalunya (CTTC) desde mediados del 2002. El objetivo del artículo es presentar la arquitectura del testbed ADRENALINE (sección 2), los principales experimentos de I+D realizados en estos últimos 4 años (sección 3), así como la evolución del testbed

hacia su segunda fase: ADRENALINE+ (sección 4).

2. Introducción al Testbed ADRENALINE

2.1. Arquitectura del Testbed

El testbed ADRENALINE es una red óptica genérica e inteligente basada en la tecnología DWDM y con una arquitectura dividida en tres planos muy bien diferenciados: plano de transporte, plano de control y plano de gestión (Fig. 1).

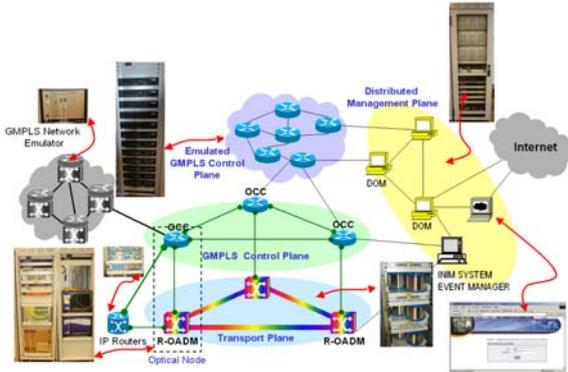


Figura 1. Arquitectura testbed ADRENALINE.

El plano de transporte óptico del testbed ADRENALINE tiene como principales funciones la provisión de canales ópticos reconfigurables (espacio y frecuencia) extremo a extremo, de manera transparente al formato de las señales de los diferentes clientes, y la monitorización del estado de las conexiones (control de la calidad de servicio y detección de errores) y del funcionamiento de los dispositivos ópticos que lo componen. El plano de transporte óptico está compuesto por un anillo DWDM con 3 nodos de transporte óptico formados por una etapa de inserción/extracción óptica, basada en un R-OADM, y una etapa de distribución óptica, basada en un OXC y un sistema de transceptores ópticos sintonizables. Estos nodos pueden funcionar de manera unidireccional o bidireccional soportando las protecciones de canal óptico (OCh) y de multiplexado de sección (OMS). Cada par de nodos está conectado mediante enlaces bidireccionales de 35 Km. de fibra óptica, con un resultado final de 210 Km. Además, estos nodos cuentan con 8 transceptores ópticos DWDM, 6 de los cuales contienen un láser sintonizable, con tasas de transmisión de hasta 2,5 Gb/s, mientras que los otros 2 trabajan a una longitud de onda fija. La etapa de conmutación del nodo de transporte óptico está basada en la combinación de dos matrices de conmutadores ópticos 2x2 reconfigurables, para insertar y extraer longitudes de onda, y de un dispositivo AWG (*Arrayed Waveguide Gratings*) de 18x18, que actúa como router de longitudes de onda. Esta etapa incorpora además una tarjeta de control, la cual se encarga de gestionar el funcionamiento de las matrices de conmutación. Finalmente, la etapa de distribución óptica del nodo de transporte está compuesta por un OXC de 32x32, basado en tecnología de conmutación por micro espejos

denominada MEMS, un sistema de transceptores ópticos y equipos de cliente. La función principal del OXC es realizar la interconexión (distribución de los canales insertados/extraídos) entre la etapa de inserción/extracción y el sistema de transceptores DWDM, el cual conecta con los equipos de cliente, que transmiten y reciben datos de forma óptica a 1310 nm.

El plano de control del testbed ADRENALINE es distribuido y está basado en el conjunto de protocolos GMPLS, y su misión principal es realizar en tiempo real el establecimiento, mantenimiento y eliminación de canales ópticos, de manera dinámica y flexible, mediante la utilización de los protocolos de señalización y encaminamiento RSVP-TE y OSPF-TE respectivamente. La arquitectura del plano de control está compuesta por una red de comunicación de datos (DCN) y por 14 controladores de conexiones ópticas (OCCs), 3 de los cuales tienen hardware óptico asociado y el resto lo emula. La DCN está implementada por enlaces Fast Ethernet transportados fuera de banda a 1310 nm, lo que permite establecer canales de control con conectividad IP entre nodos ópticos vecinos. Los OCCs son plataformas GNU/Linux, basadas en Intel Xeon a 3,0 GHz con 1 Gbyte de RAM, que desempeñan la función de routers IP, utilizando direcciones IPv4, y que han sido diseñados siguiendo la arquitectura propuesta en la recomendación ITU-T G.8080 para la manipulación de los recursos disponibles de la red y el intercambio de mensajes de control. Estos OCCs están compuestos por los siguientes controladores: RSVP-TE para la señalización de establecimiento de canales, OSPF-TE para el encaminamiento, LRM para la gestión de los recursos de enlace, SNMP para la gestión de las conexiones *soft-permanent* (SPCs) y OLRM para el control del hardware óptico. Además, cada OCC dispone de tres tarjetas Gigabit Ethernet mediante las cuales es posible establecer redes virtuales de área local (VLANs) según el estándar 802.1q [8].

El plano de gestión del testbed ADRENALINE está implementado en tres capas. La primera capa se encarga de la gestión de las peticiones de conexión recibidas a través de las diferentes interfaces de usuario, y para ello se ha realizado una combinación del clásico protocolo SNMP y de la tecnología XML. La segunda capa representa la descentralización del sistema de gestión de red (NMS) mediante la utilización de sistemas de gestión distribuidos. Y finalmente, la tercera capa es la responsable de realizar un reparto eficiente tanto de las funciones como de la información de gestión para evitar la duplicación de datos y optimizar el funcionamiento de los servicios. La arquitectura del sistema de gestión, de acuerdo con la recomendación ITU-T G.8080, está compuesta por DOMs que actúan sobre los planos de control y de transporte de la red para realizar la gestión de las

SPCs a través de los controladores de gestión SNMP. Además, el plano de gestión cuenta con un sistema de monitorización distribuido cuya función es recoger información tanto analógica como digital del funcionamiento de la red y de la utilización de la misma.

Como resultado de la interacción de estos tres planos, ADRENALINE testbed permite el establecimiento de conexiones ópticas solicitadas por los equipos cliente a través de la UNI (User Network Interface) o por el operador de red mediante el sistema de gestión NMS.

2.2. Configuración del testbed: ADNETCONF

Una de las características que hacen de ADRENALINE un testbed flexible y altamente productivo para la investigación es la gran reconfigurabilidad de su plano de control. Distintas topologías de OCCs (e.g. anillos, mallas, etc.) pueden ser construidas a nivel lógico haciendo uso de una misma arquitectura física, sin necesidad de hacer cambios en la infraestructura (reconexiones de cables, etc.).

La infraestructura física que sustenta el plano de control está formada por un *backbone* de conmutadores Ethernet interconectados entre sí al que están conectados los OCCs y otros equipos auxiliares (como un emulador de enlace o los clientes UNI de la red óptica). Mediante la tecnología 802.1q [8] (soportada tanto por los conmutadores del *backbone*, como por los OCCs y demás equipos auxiliares) es posible crear enlaces entre OCCs (a nivel 2) completamente desacoplados de la infraestructura física. Cuando es necesario emular algún parámetro en estas conexiones (e.g., retardo), el emulador de enlace se sitúa entre ambos OCCs, y se utilizan túneles GRE (*Generic Routing Encapsulation*) [9] (a nivel 3) para que su presencia sea completamente transparente. La emulación de enlace se realiza mediante NISTNet [10].

Realizar el cambio entre una topología y otra implica acceder a cada uno de los elementos de la infraestructura (existe una red virtual 802.1q fija de destinada a tal efecto) y realizar una serie de operaciones de configuración (en conmutadores, OCCs, equipos cliente, etc.): habilitar redes 802.1q en los conmutadores, crear interfaces para estas redes en los OCCs, configurar túneles GRE, asignar direcciones IP, etc. Efectuar estas operaciones de forma manual es posible, pero implica grandes inconvenientes. En primer lugar, se consume una cantidad ingente de tiempo realizando una tarea tediosa y mecánica, muy poco productiva desde el punto de vista de la investigación que es objeto del testbed. En segundo lugar, es muy posible cometer errores humanos al introducir estas configuraciones, muchas veces difíciles de detectar a posteriori.

Finalmente, es poco escalable, ya que cuanto más grande y más compleja es la topología a crear, mayor es el número de operaciones de configuración a realizar, y, por tanto, mayor el tiempo que se pierde y la probabilidad de introducir algún error.

Para evitar estos problemas, se ha desarrollado la herramienta ADNETCONF¹ (*ADrenaline NETwork CONFigurator*) [11]. Esta herramienta permite diseñar de forma gráfica la topología lógica deseada y, una vez hecho esto, desplegarla de forma automática (Fig. 2). La automatización del procedimiento de despliegue (y de eliminación del despliegue cuando se desea liberar el testbed para configurar una nueva topología) ahorra una gran cantidad de tiempo y evita los errores humanos. Como ventaja adicional, se consigue que el investigador se concentre en la definición de su modelo de red a alto nivel y que no tenga que preocuparse (ni siquiera conocer) los detalles de bajo nivel (802.1q, túneles GRE, etc.).

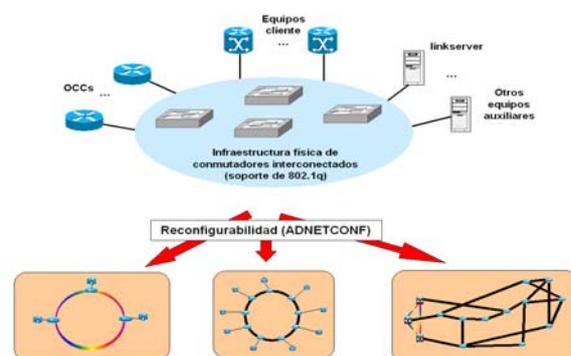


Figura 2. Uso de ADNETCONF para desplegar distintas topologías lógicas sobre la misma infraestructura física

Es de destacar que ADNETCONF no sólo se encarga de la configuración de la topología a nivel de red, sino que realiza también la configuración de los distintos procesos del plano de control que se ejecutan en cada OCC. En particular, se configuran cinco procesos (descritos anteriormente en la sección 2.1): OSPF-TE, RSVP-TE, LRM, OLRM (solo en aquellos OCCs asociados a hardware óptico) y SNMP. Esto convierte a ADNETCONF no sólo en sistema de automatización de despliegue de topologías, sino en una herramienta vertical que integra configuraciones completas (red y procesos) en torno al concepto de *escenario* (un escenario es la configuración de la red, junto con las configuraciones de cada proceso). Adicionalmente, ADNETCONF permite realizar operaciones de monitorización, comprobando si hay problemas en el escenario, ya sea a nivel de red o en alguno de los procesos que se ejecutan en cada OCC. Finalmente, señalar que ADNETCONF está completamente orientada al plano de control. La topología del plano de transporte, formado por un anillo de fibra óptica,

¹ Parte de la tecnología que emplea ADNETCONF para el despliegue de redes lógicas está actualmente pendiente de patente [12].

es fija y, por tanto, queda fuera de las operaciones de reconfiguración que realiza la herramienta.

3. Investigación Experimental sobre C&M (Control y Gestión) en ADRENALINE testbed

3.1. Aprovisionamiento de canales ópticos bidireccionales en anillos unidireccionales

El aprovisionamiento de canales ópticos bidireccionales sobre anillos unidireccionales con R-OADM's utilizando un plano de control GMPLS no había sido considerado en la literatura existente. En la arquitectura básica de GMPLS, las conexiones ópticas bidireccionales (flujo de datos descendente de origen a destino y ascendente de destino a origen) se establecen de forma conjunta utilizando el único conjunto de mensajes de señalización entre el nodo origen y el destino, utilizando el objeto *Upstream Label*. Este mecanismo no se puede aplicar en anillos ópticos unidireccionales, debido a que los flujos de datos descendentes y ascendentes no comparten el mismo enlace como sucede en anillos bidireccionales o redes malladas. En los anillos unidireccionales, una de las dos fibras se utiliza para el transporte de canales ópticos de tráfico en servicio que marca el sentido de transmisión (en el sentido de las agujas del reloj), mientras que la otra fibra se reserva para la protección de los canales ópticos (en el sentido opuesto a la agujas del reloj). En la Fig. 3 se muestra un ejemplo de canal óptico bidireccional entre el nodo 1 y 3. Tal y como se puede observar en la figura, el canal descendente pasa a través del nodo 2, mientras que el ascendente cruza el nodo 4.

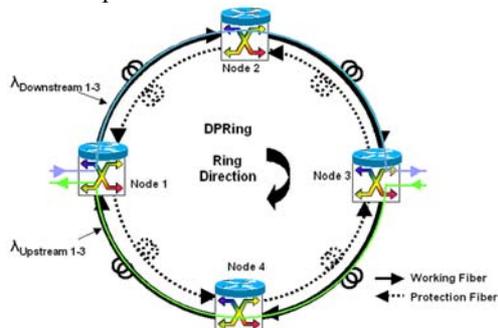


Figura 3. Canal bidireccional en anillo unidireccional

En [13] se presentó y comparó por primera vez el rendimiento de dos propuestas experimentales de aprovisionamiento de canales ópticos bidireccionales sobre un anillo unidireccional utilizando extensiones al protocolo de señalización GMPLS RSVP-TE, denominados *Whiting Reservation Protocol* (WRP) y *Salmon Reservation Protocol* (SRP). SRP minimiza los tiempos de establecimiento de conexiones ópticas pero introduce contención de lambdas (LCP) entre dos peticiones que viajan en sentido opuesto en un mismo enlace cuando ambas peticiones han reservado los mismos recursos en el mismo instante de tiempo en cada lado del enlace. En cambio WRP

se basa en evitar la contención de lambdas, pero penalizando el tiempo de establecimiento de los canales ópticos.

Básicamente en SRP el nodo origen genera en paralelo dos peticiones RSVP de conexiones ópticas. Una de ellas solicita el canal óptico para el flujo de datos descendente siguiendo el sentido de transmisión del anillo (agujas del reloj) mientras que la otra solicita el canal óptico para el flujo de datos ascendente en el sentido opuesto al de transmisión del anillo (sentido contrario agujas del reloj). Ambas peticiones RSVP se asocian utilizando el campo de "nombre de sesión" del objeto *Session Attribute*. Este campo identifica unívocamente ambas peticiones. En WRP el nodo origen genera una petición de conexión RSVP, solicitando el canal óptico descendente siguiendo el sentido de transmisión del anillo, e indicando que también se requiere un canal óptico ascendente, pero sin ejecutar ninguna acción en ningún nodo intermedio para el canal ascendente. Una vez la petición alcanza el nodo destino, éste genera automáticamente una nueva petición de conexión RSVP hacia el nodo origen para solicitar el canal óptico ascendente, siguiendo también el sentido de transmisión del anillo.

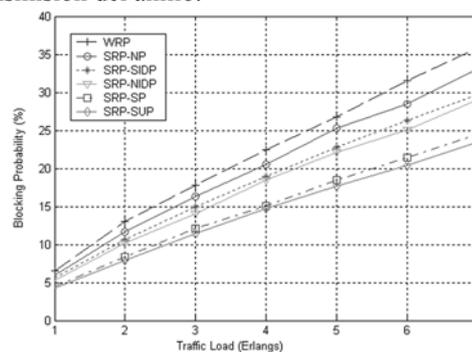


Figura 4. Evaluación WRP y SRP con LCP.

Con el fin evaluar el efecto de la contención entre conjunto de lambdas, en la evaluación del SRP y WRP se ha utilizado el esquema de reserva de longitudes de onda *Forward Reservation Protocol* (FRP) en el cual se reserva los recursos del nodo origen hacia nodo destino. Se han propuesto 3 nuevas estrategias de contención para conjuntos de lambdas que se han comparado con la propuesta estándar de la IETF y sin utilizar ninguna política de LCP. La evaluación del rendimiento muestra que SRP siempre funciona mejor que WRP en términos de probabilidad de bloqueo y tiempo de establecimiento, incluso cuando no se aplica ninguna política de contención. Con las políticas de contención propuestas, la probabilidad de bloqueo del SRP (Fig. 4) se puede reducir hasta un 40% en comparación con el WRP y un 23% con respecto a SRP utilizando la política estándar de la IETF.

3.2. Aprovisionamiento de Canales Ópticos bidireccionales utilizando información

global distribuida sobre el estado de las longitudes de onda.

Una conexión dentro de una red de transporte óptica (*lightpath*) suele ser bidireccional [14]. Esto significa que dos conexiones unidireccionales viajando en direcciones opuestas (i.e., desde el origen a destino, *descendente* y viceversa, *ascendente*) necesitan ser establecidas para cada petición. En este contexto, la utilización de un plano de control basado en GMPLS (encaminamiento y señalización) permite de forma dinámica y automática establecer *lightpaths* entre cualquier par de puntos de la red. Más aun, el protocolo de señalización GMPLS RSVP-TE [6] fue extendido con el denominado *Upstream Label Object* permitiendo así solicitar conexiones bidireccionales usando un único conjunto de mensajes de control RSVP *Path* y *Resv*, tal y como se hace para conexiones unidireccionales, explicado en la sección 3.1. Por lo tanto, incluyendo el anterior objeto en el mensaje *Path*, desde el origen al destino, los nodos que reciben tal mensaje, se configuran para reservar los recursos (i.e., longitud de onda) y ofrecer así el servicio al flujo de datos ascendente. Cabe resaltar, que los recursos para el flujo de datos descendente, son seleccionados por éste último, e informado al resto de los nodos conformando el camino óptico mediante el mensaje de control *Resv*. Teniendo en cuenta este modelo, el aprovisionamiento de una conexión bidireccional se realiza en dos pasos: primero calcular la ruta (nodos y enlaces) desde el origen a destino con suficiente capacidad (ancho de banda) difundido mediante el protocolo GMPLS OSPF-TE [5], y a continuación utilizar RSVP-TE para la reserva de longitudes de onda sobre cada link y nodo involucrado para ambos flujos (descendente y ascendente).

El problema con el anterior surge cuando se aplica sobre redes ópticas transparente sin conversión de longitud de onda, problema conocido como *Wavelength Continuity Constraint* (WCC). La transparencia permite transportar datos de extremo-a-extremo siempre en el dominio óptico, sin intervención de costosos conversores electro-ópticos en la conmutación. Si además, no se permite conversión de longitud de onda en la conmutación óptica, esto impone que la señal extremo a extremo se transporte enteramente sobre una misma longitud en cada enlace. En entornos de tráfico dinámicos donde las peticiones llegan y acaban sin provisión, WCC tiene un considerable impacto en los resultados (probabilidad de bloqueo): concretamente, si uno encamina por la ruta más corta sin noción de cómo es el estado de los recursos (longitudes de onda) en cada enlace, es muy probable que la conexión se bloquee, ya que la longitud de onda escogida para transportar el flujo de datos de dicha petición está ocupada por otra conexión anterior.

Más concretamente, el problema anterior es más evidente en conexiones bidireccionales ya que la restricción WCC debe ser satisfecha para los flujos descendente y ascendente. GMPLS RSVP-TE permite un mecanismo para solucionar WCC en el flujo de descendente, ya que la longitud de onda para éste se selecciona en el destino de entre todas las longitudes de onda no utilizadas, las cuales han sido recogidas en el viaje del mensaje *Path* dentro del objeto *Label Set Object* [6]. Sin embargo, para el flujo ascendente, la longitud de onda se selecciona en el origen, y se espera que esté disponible en todo los enlaces y nodos de la ruta, lo cual resulta bastante improbable. Para mejorar esta deficiencia, en [15][16] fueron propuestas nuevas extensiones al protocolo de enrutamiento GMPLS OSPF-TE, para difundir no sólo la capacidad de los links (i.e., ancho de banda), si no también, el estado de las longitudes de onda en cada uno de ellos. De ahí, cada nodo conoce el estado de las longitudes de onda en cada enlace de la red, y por lo tanto un algoritmo de encaminamiento eficientemente usa dicha información, y ayuda a la señalización a satisfacer la restricción WCC sobre los flujos de una conexión bidireccional.

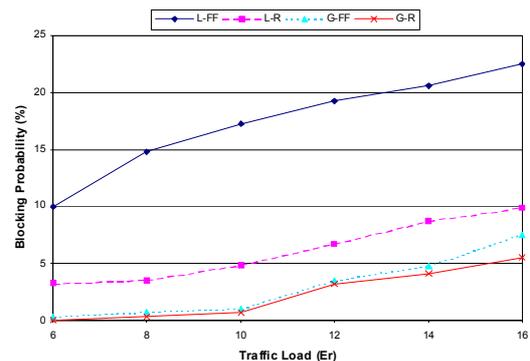


Figura 5. Probabilidad de bloqueo (%) respecto tráfico ofrecido (Er.)

En la Fig. 5 se muestra la probabilidad de bloqueo respecto a la carga ofrecida (Erlangs) en una red de 7 nodos con topología de malla. Más detalles acerca del algoritmo propuesto así como las extensiones al protocolo de enrutamiento y la experimentación realizada se encuentran en [15][16].

3.3. Diseminación de información global sobre el estado de las longitudes de onda mediante protocolos de señalización en anillos unidireccionales.

En un plano de control distribuido basado en la arquitectura de protocolos GMPLS, cada nodo toma sus propias decisiones de encaminamiento y asignación de longitud de onda para peticiones de canales ópticos basándose en la información del estado de la red óptica (topología y recursos) que éste mantiene, la cual puede ser global o local. En redes de transporte GMPLS, mejoras a los protocolos de pasarela interior IP (i.e. OSPF-TE o IS-IS-TE extendidos) pueden ser utilizados para diseminar (periódicamente o mediante umbrales)

información del estado de la red, de tal forma que cada nodo en la red pueda tener un conocimiento global del estado de la red, utilizando mensajes de actualización *Link-State Advertisement* (LSA), tal y como se ha introducido en la sección 3.2. La diseminación del estado de las longitudes de onda no está soportada por el estándar actual de GMPLS. Para el caso en el que un nodo sólo conoce el estado de sus enlaces inmediatos (no se utilizan protocolos de encaminamiento), el problema de encontrar una ruta se puede simplificar utilizando un planteamiento basado en encaminamiento fijo/fijo-alternativo, en el que una única/conjunto de ruta/s fija/s es/son predeterminada/s para cada par de nodos origen-destino. Con respecto a la asignación de longitud de onda, la situación se complica, ya que el nodo origen no sabe qué longitudes estarán disponibles a lo largo de la ruta completa de origen a destino. Especialmente cuando no se dispone de convertidores de longitud de onda, y por consiguiente un canal óptico se debe establecer utilizando, la misma longitud de onda en todos los enlaces a lo largo del camino (WCC).

El mecanismo de reserva de longitudes de onda de GMPLS se basa en un protocolo de reserva híbrido (HRP) que combina FRP (*Forward Reservation Protocol*, reserva las longitudes de onda de origen a destino) y BRP (*Backward Reservation Protocol*, reserva de longitudes de onda de destino a origen), utilizando el objeto *Suggested Label* (Reserva FRP conservadora) y el *Label Set* (Reserva BRP) conjuntamente. El primero permite al nodo origen especificar una preferencia por una longitud de onda, de tal forma que sea reservada por todos los nodos descendentes hacia el destino para el establecimiento del canal óptico que se está solicitando. Esta sugerencia de longitud de onda, es, como su nombre indica, una sugerencia, por lo tanto, si algún nodo intermedio no puede reservarla, simplemente se continua con la petición. El segundo objeto se utiliza para asegurar la continuidad de longitud de onda, de tal forma que se colecta la información de longitudes de onda continuas de origen a destino. El principal inconveniente de este esquema híbrido es que la elección del *Suggested Label* se realiza en el nodo origen, el cual solo tiene información local del estado de las longitudes de onda. En este caso el *Suggested Label* se elige de forma aleatoria (o la primera) del conjunto de longitudes de onda del *Label Set*. Por lo tanto no existe ninguna garantía que la longitud de onda seleccionada esté disponible en todos los enlaces de la ruta. Con el fin de solucionar este problema,

En [19] se propuso un esquema GMPLS de reserva de longitudes de onda (denominado *Global Reservation Scheme*) que permite tener información global del estado de longitudes de onda cuando se solicitan canales ópticos bidireccionales en un anillo unidireccional, utilizando sólo el protocolo de señalización basado en SRP (sección 3.1). En

nuestra propuesta cada nodo en la red mantiene una tabla de recursos de longitudes de onda global, indicando que longitudes de onda están disponibles en todos los enlaces del anillo, y utilizando nuevas extensiones GMPLS RSVP-TE a los mensajes Path y Resv es posible actualizar la tabla de recursos de longitudes de onda cada vez que se solicita un canal bidireccional.

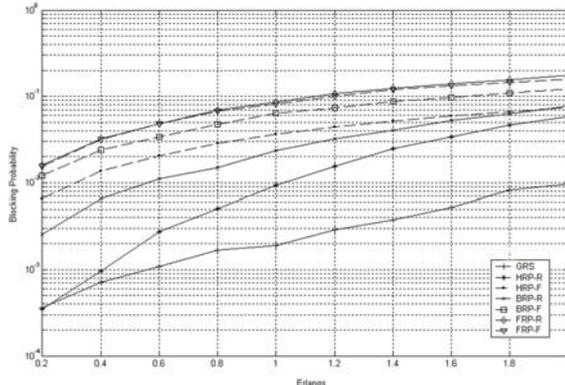


Figura 6. Evaluación probabilidad bloqueo GRS.

Por primera vez se comparó el comportamiento de los mejores protocolos de reserva de longitudes de onda diseñados para redes malladas, como el HRP, con el esquema de reserva propuesto, el GSR, que permite reducir la probabilidad de bloqueo de conexiones ópticas hasta un 85% en comparación con el HRP, tal y como se puede observar en Fig. 6.

3.4. Aprovechamiento de canales ópticos teniendo en cuenta información sobre las degradaciones de la señal óptica.

ADRENALINE es una red de transporte óptica transparente, o lo que es lo mismo, las conexiones ópticas entre un par de puntos de la red permanecen en el dominio óptico. Esto implica la ausencia de regeneradores 3R (*retiming, reshaping y reamplification*) eléctricos en nodos intermedios, lo cual se traduce en tres principales beneficios con respecto a las redes “opacas”, donde la señal, en cada nodo es convertida a eléctrico, conmutada y vuelta a convertir a óptico. Por tanto, tales beneficios son: reducir costes en infraestructura (transponders y regeneradores 3R), permitir a la red ser indiferente al formato y velocidad de los datos transportados, y eliminar el cuello de botella que los elementos electrónicos introducen frente a la gran capacidad dada por la tecnología DWDM. Sin embargo, mientras la señal óptica viaja a través de la red, sufre ciertas degradaciones que pueden influir negativamente en la calidad de señal recibida, y por lo tanto en la QoS de servicio en general [17]. Dichas degradaciones físicas son intrínsecas tanto al canal (i.e., fibra óptica) como a los dispositivos que la señal encuentra para ser encaminada, conmutada (OXC y R-OADM) y amplificada (amplificadores EDFA). Concretamente, estas degradaciones de carácter físico se pueden listar en: pérdidas de potencia y dispersión (cromática y de modo de

polarización, PMD) introducidas por la fibra óptica, ruido introducido por la amplificación, y *cross-talk* así como pérdidas debidas a los elementos de mux/demux y filtros y conmutadores en los OXCs y/o R-OADMs.

Teniendo en cuenta los anteriores parámetros físicos resulta necesario que dado los exigentes requisitos de calidad en los servicios actuales, los mecanismos de aprovisionamiento los tengan en cuenta en el momento de decisión tanto de encaminado como de establecimiento. Por esta razón, el objetivo es suministrar a la inteligencia óptica, representada por el plano de control GMPLS (OCC), información no tan sólo acerca de la topología de la red y recursos (ancho de banda disponible) para la optimización global de la red, si no también de los parámetros físicos para la optimización (QoS) de los servicios (*lightpaths*) que se establezcan sobre ella. Con esta finalidad, y gracias a los recientes adelantos en técnicas de monitorización óptica (e.g., barrido del espectro en milisegundos extrayendo tan sólo un 5% de la señal), la idea es utilizar dichos parámetros monitorizados (la relación señal a ruido óptica, OSNR) como elementos decisivos acerca de la calidad de la señal óptica. En la Fig. 7, se muestra la arquitectura principal de un plano de control basado en GMPLS, al cual se le suministra información de parámetros físicos a través del OPM. En dicho modelo, similarmente a cómo se mantiene el estado de los recursos de ingeniería de tráfico (TE) dentro de la red, se informa automáticamente al plano de control (OCC) de todos los parámetros físicos monitorizados (OSNR o potencia óptica). De esta forma, el controlador de encaminamiento (RC) es localmente consciente de dicha información en sus propios enlaces. Con el fin de globalizar y difundir toda la información física por enlace en toda la red, el protocolo de encaminamiento OSPF-TE es extendido para poder transportarla y almacenarla en la database TE-LSDB. Estas extensiones se realizan de forma análoga a los atributos TE (ancho de banda), es decir, los parámetros físicos se difunden agregados por enlace, y no por canal DWDM, para poder así salvaguardar la escalabilidad del protocolo. Como resultado, eficientes algoritmos de encaminamiento permitirán calcular de forma dinámica y distribuida rutas extremo-a-extremo que óptimamente satisfarán los requisitos de las conexiones en ambos aspectos: aprovisionamiento y optimización de recursos y calidad de la señal en recepción, utilizando como parámetros de entrada los almacenados en sus propios TE-LSDBs.

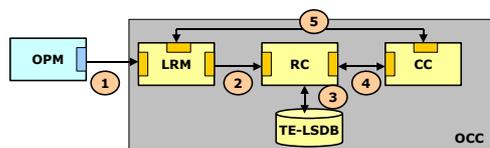


Figura 7. Arquitectura de OCC con información de parámetros físicos.

Más información acerca de la arquitectura, algoritmos de encaminamiento y extensiones al protocolo OSPF-TE propuestos así como resultados de tiempos entre el OPM y el OCC, se pueden encontrar en [18].

3.5. Mecanismo de Gestión de múltiples averías del Canal de Control en redes ópticas GMPLS.

En la arquitectura GMPLS los canales de control entre cada par de nodos ópticos no están forzados a utilizar el mismo enlace físico que los canales de transporte/datos. En GMPLS, se utilizan dos redes independientes para la transmisión y/o intercambio de datos e información de control. Nos referimos a estas redes como plano de transporte y plano de control respectivamente. Dado que ambos planos, de transporte y de control, no necesitan ser idénticos o congruentes, dos nodos adyacentes en el plano de transporte podría no serlo en el plano de control. GMPLS propone utilizar el LMP (Link Management Protocol) para el establecimiento y gestión de los canales de control. Cada canal de control negocia individualmente sus parámetros y mantiene la conectividad utilizando un protocolo de Hello. El único requerimiento que impone GMPLS es que debe haber al menos un canal de control bidireccional entre cada par de nodos ópticos para señalización y encaminamiento.

El problema aparece cuando, debido al hecho de permitir a los canales de control estar físicamente diversos de los enlaces de datos asociados, se puede dar el caso en el que no haya canales de control activos disponibles mientras los canales de datos aún están en uso. Las averías de los canales de control no deben tener impacto en las conexiones existentes, es decir, un enlace que está transportando tráfico de datos no debe ser eliminado porque el canal de control no está activo. Pero debido a la carencia del canal de control, no se podría garantizar durante más tiempo el mismo nivel de servicio de recuperación (protección y restauración). Bajo estas circunstancias el enlace se debe considerar que está degradado. Esto significa que el encaminamiento y la señalización deberían ser notificados para que no acepten nuevas conexiones, y el enlace se anuncie como si no tuviera recursos libres.

En general GMPLS considera dos instancias de encaminamiento, cada una relacionada con su propio plano (control y transporte). El encaminamiento en el plano de control se lleva a cabo mediante el protocolo OSPF. OSPF disemina el estado de cada interfaz activa de control mediante paquetes de actualización LS, llevando a cabo una base de datos de estado de enlaces (LSDB). A partir de este repositorio, cada nodo es consciente de la información de la topología de control completa, a partir de la cual construye su tabla de encaminamiento, utilizando, por ejemplo un

algoritmo de cálculo de ruta de menor coste como Dijkstra. Aunque ha habido grandes adelantos en los tiempos de convergencia del enrutamiento, estos continúan siendo del orden de varios segundos, cuando se produce cualquier cambio en la topología de la red, e incluso aunque se detecten las averías de los canales de control de forma explícita a nivel hardware sin utilizar los mecanismos de Hellos. Estos tiempos de recuperación del plano de control podrían ser aceptables para el servicio de aprovisionamiento, ya que durante unos pocos segundos no se podría dar servicio, pero en cambio es totalmente inaceptable para los servicios de restauración en caso de avería de la capa óptica, especialmente para el caso de protección, donde se requieren tiempos de recuperación del canal óptico inferiores a 50ms.

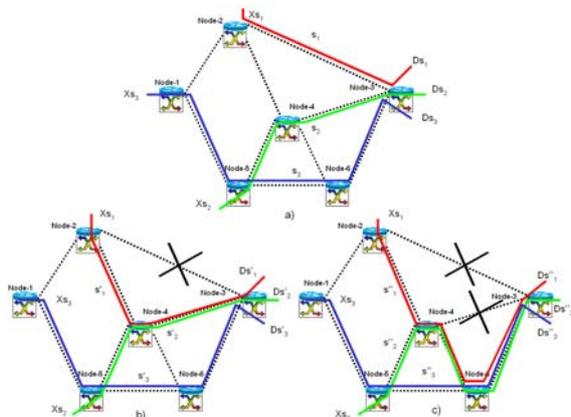


Figura 8. Ejemplo de múltiples averías secuenciales de canales de control y aplicación del backup

Con este fin, se propuso en [20] un mecanismo de gestión multi-avería del canal de control (Fig. 8., que involucra encaminamiento, señalización y gestión de enlaces con extensiones a los protocolos GMPLS, n el fin de mantener el mismo nivel de servicio (en términos de aprovisionamiento y recuperación). Este mecanismo consiste en calcular una ruta de respaldo (*backup*) para todos los enlaces de control a nivel local cada vez que hay cualquier cambio en la topología de la red. Esta ruta de backup por canal de control se almacena en la tabla de rutas de cada nodo. El canal de backup se guarda en forma de ruta explícita, es decir, se especifica una lista estricta de nodos por los que debe circular. Esta ruta de backup de control se denomina CERO (Control Explicit Route Object) y permite que dos nodos que son adyacentes a nivel de transporte puedan utilizar una ruta no adyacente a nivel de control impuesta de manera explícita. El CERO se introduce en los paquetes de control de señalización (RSVP-TE) y gestión de enlace (LMP). El contenido del paquete sólo se procese en los extremos, es decir, los nodos intermedios que detectan un paquete de control con el objeto CERO deben reenviar el paquete sin procesar su contenido. Cuando el paquete de control alcanza el último nodo especificado en el CERO, este nodo elimina el CERO y continúa con su proceso de forma normal,

reenviando el paquete al siguiente nodo especificado en el ERO del plano de transporte.

3.6. Protección de Canales ópticos 1+1 y 1:1 en redes de transporte GMPLS transparentes.

Motivada por la tendencia actual hacia la oferta de servicios de datos de alta QoS y disponibilidad, una línea activa de investigación concierne los mecanismos de protección en servicios de conectividad óptica. En general, la selección y evaluación de un mecanismo se basa en un compromiso entre los recursos utilizados y/o bloqueados y la minimización del tiempo necesario para restaurar la conectividad en caso de fallo. Por ejemplo, los mecanismos con un tiempo mínimo de restauración suelen necesitar el aprovisionamiento de recursos dedicados y en consecuencia un uso menos eficiente de los recursos de la red.

Varios esquemas de protección han sido implementados: protección 1+1, protección 1:1 y protección de camino compartido (Shared Path Protection). En esta sección detallamos los dos primeros esquemas:

- En mecanismos de protección 1+1, una conexión de protección dedicada se establece para cada conexión que se desea proteger. La información se transmite en ambas conexiones y se activa la que ofrece mayor calidad (e.g., en función de la potencia recibida). Las limitaciones actuales pueden imponer restricciones adicionales a las longitudes de onda como la continuidad (misma longitud de onda a lo largo del camino óptico) y unicidad (igualdad de longitud de onda de la conexión principal y de protección).
- En mecanismos de protección 1:1, una conexión de protección dedicada se establece para cada conexión que se desea proteger, pero se permite que tráfico menos prioritario utilice la conexión de protección siempre y cuando la conexión principal pueda hacer uso del canal de protección en caso de avería.

La solicitud de establecimiento de un canal óptico protegido la realiza el cliente mediante una señalización GMPLS/UNI, especificando el mecanismo de protección deseado. A nivel del plano de control de ADRENALINE dos paradigmas básicos permiten evaluar el compromiso entre la eficiencia de la red (medida en términos de probabilidad de bloqueo) y la cantidad de información de control que es necesario diseminar: *en el paradigma con información global*, el protocolo de encaminamiento (OSPF-TE) se ocupa de diseminar, mediante extensiones desarrolladas a tal efecto, el estado de las longitudes de onda disponibles en cada enlace. *En el paradigma con información local* no se dispone de esta

información, con lo cual se hace una preselección de la longitud de onda con las restricciones aplicables.

El modo global permite al OCC de entrada calcular no sólo las rutas de las conexiones activa y de protección, sino también de las longitudes de onda a utilizar, tanto en la conexión principal como en la conexión de protección, garantizando a priori una conexión con éxito (con la posible excepción de problemas de retardo en la sincronización de informaciones o la aplicación de políticas de contención cuando dos conexiones concurrentes solicitan el mismo recurso). El modo local necesita mayor cooperación entre los nodos de la red al establecer la conexión, y se caracteriza por una mayor probabilidad de bloqueo debido a la falta de conocimiento del estado de las longitudes de onda en enlaces distintos a los enlaces locales.

En estudios recientes en condiciones reales [21] se evaluaron los tiempos de restauración del mecanismo de protección 1+1. En el escenario utilizado, ilustrado en Fig. 9, se estableció una conexión protegida entre el nodo OCC3 y OCC2, y se procedió a simular un fallo en el enlace OCC1-OCC3.

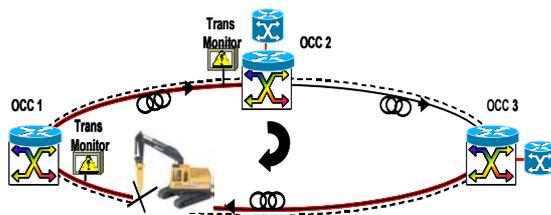


Figura 9. Escenario para la validación de mecanismos de protección 1+1

Tal como se muestra en la Fig. 10, el tiempo de restauración (considerando el tiempo entre la detección de la pérdida de potencia óptica en recepción, pasando por la notificación a nivel del plano de control hasta el nodo origen, hasta la detección de niveles correctos de recepción de potencia) es del orden de 45 ms, por debajo de los 50 ms que se considera un orden de magnitud estándar en servicios clásicos como telefonía o redes SDH).

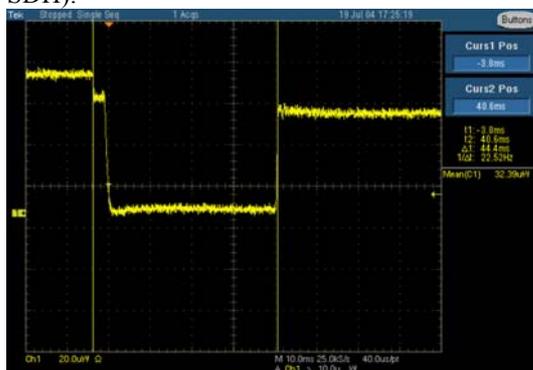


Figura 10. Tiempos de restauración en esquema de protección 1+1.

Resultados ligeramente superiores se obtuvieron en esquemas de protección 1:1 [22] (del orden de 100 ms), debido a la necesidad de dar preferencia a la conexión protegida respecto a la conexión menos prioritaria y a su posterior activación.

En resumen, los estudios realizados permitieron corroborar la viabilidad de un plano de control dinámico basado en GMPLS y sus correspondientes mecanismos de protección y restauración.

3.7. Suministro de conexiones ópticas mediante interfaces hombre-máquina

Tal como se ha visto en secciones anteriores, el plano de control GMPLS ofrece la posibilidad de suministrar ancho de banda bajo demanda de forma dinámica y rápida. Además de solicitar conexiones mediante la interfaz UNI (User Network Interface) o también conocido como la interfaz máquina-red (sin intervención humana), definido en el estándar ITU-T G.8080 [23] y que será integrado en los equipos cliente de las redes ópticas, en el futuro será necesario mantener el suministro de conexiones ópticas con intervención humana, ya sea el operador de la red o un usuario de la misma. Para ello, el plano de gestión de la red óptica debe integrar una interfaz hombre-máquina que actúe como enlace entre el sistema de gestión (NMS) y los solicitantes de conexiones ópticas, y también una interfaz con el plano de control, responsable del establecimiento de las mismas. En ADRENALINE, la primera interfaz recibe el nombre de *User Management Interface* (UMI) [24]. La interfaz con el plano de control se denomina *Network Management Interface* (NMI) y está definida en [23].

3.7.1. Portal netcat.cttc.es

Además de una interfaz gráfica para el operador, el NMS del testbed ADRENALINE está dotado con una UMI para recibir peticiones externas de usuarios de la red óptica. Éstos acceden al sistema de gestión mediante aplicaciones de gestión dedicadas, con una UMI similar al funcionamiento de UNI [24], o a través del portal de Internet *netcat.cttc.es* (Fig. 11).

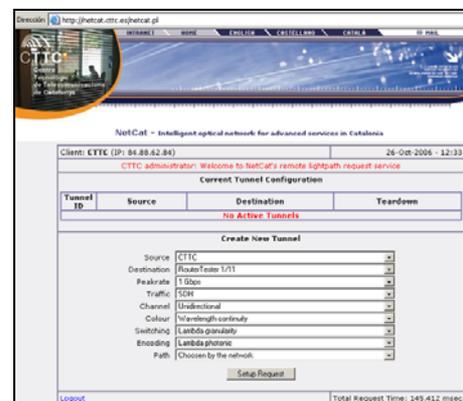


Figura 11. Portal netcat.cttc.es

eXtensible Markup Language (XML) es una tecnología con gran potencial para las comunicaciones, como viene demostrando el gran éxito de los Web Services. Haciendo uso de esto, las peticiones a través de *netcat.cttc.es* son encaminadas al NMS mediante un UMI basado en XML sobre *HyperText Transfer Protocol*. Así, el NMS actúa de proxy entre los usuarios y el plano de control GMPLS pues traduce las peticiones de los usuarios, generadas mediante las opciones de conectividad ofrecidas en *netcat.cttc.es* dependiendo del perfil del usuario, a peticiones de conexión *soft-permanent* [23], que son enviadas al plano de control mediante la interfaz NMI. Para ello, ADRENALINE cuenta con una NMI basada en *Simple Network Management Protocol*, el protocolo de gestión del 90% de las redes, y una base de datos de gestión propia, GMPLS-OCC-CTTC-MIB, compatible con el *Internet Management Framework* de la IETF y detallada en [25]. Esta combinación de UMI y NMI permite la descentralización del suministro de conexiones ópticas a través del plano de gestión y la autonomía de los usuarios a la hora de solicitar ancho de banda. La Fig. 12 ilustra los tiempos de establecimiento y eliminación de conexiones ópticas mediante diferentes tecnologías de acceso a Internet, todos ellos inferiores a medio segundo.

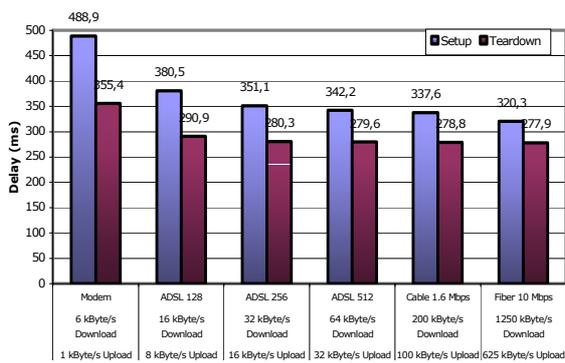


Figura 12. Tiempos de suministro por UMI

3.8. Monitorización de la calidad de servicio óptica no destructiva y en tiempo real

La monitorización del funcionamiento de las redes (*performance*) juega un papel fundamental en el despliegue y futura evolución de la industria óptica, ya que una de las claves del éxito de las redes de próxima generación será asegurar la calidad de servicio. Esta sección se centra en los resultados obtenidos en ADRENALINE referentes a la creación de contratos de servicio ‘ópticos’ y al mecanismo de diálogo entre los planos de gestión y transporte de una red WDM transparente con el fin de intercambiar información relevante para asegurar la calidad de los servicios transportados.

3.8.1. Monitorización no destructiva

En cualquier red, la información utilizada para verificar la calidad de servicio proviene de la monitorización de los datos y señales transportados. En una red todo óptica, la capa física (capa 1) es

óptica, lo que hace imposible la obtención de los parámetros digitales incluidos generalmente en los contratos de servicio, como el *Bir Error Rate* (BER) o la tasa de paquetes perdidos (PLR) a no ser que se ‘destruya’ la señal óptica, es decir, que se regenere eléctricamente, con el incremento de coste que esto conlleva. Para evitarlo, disponemos de la monitorización no intrusiva, que proporciona parámetros espectrales de los canales WDM como la potencia óptica o la relación señal a ruido óptica (OSNR), parámetros que conciernen las características analógicas de la señal óptica y no las digitales como el BER, medidos principalmente en las capas 1 (eléctrica) y 2 aunque en algunos casos permiten estimar dichos parámetros [26]. Además, los equipos cliente pueden disponer de capacidad de análisis de capa 3 (capa de red, normalmente IP) para complementar los parámetros espectrales con medidas de paquetes tales como el PLR, el retardo de paquetes o su *jitter*, importantes en los contratos de servicio (ver sección 3.8.2).

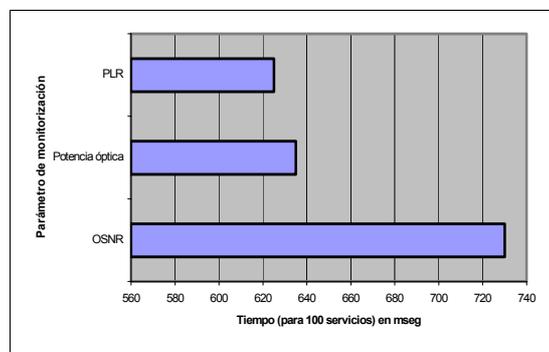


Figura 13. Tiempos de monitorización

Siguiendo esta filosofía, el testbed ADRENALINE incorpora un sistema de monitorización no intrusiva en la capa 1 óptica y la capa 3 que permite la estimación del BER mediante OSNR en cualquier punto de la red y la obtención de medidas de paquetes en los equipos clientes, todo ello en tiempos inferiores a un segundo, tal como muestra la Fig. 13. Este sistema, denominado “In-service, Non-Intrusive Monitoring” (INIM), está descrito en [26].

3.8.2. Contratos de servicio ‘ópticos’

Los servicios ofrecidos por las redes ópticas están sujetos a contratos entre los usuarios y los operadores denominados *Service Level Agreements* (SLA), que contienen, entre otros, parámetros medibles sobre los servicios, como el tiempo de la conexión, la fiabilidad (los conocidos cinco 9s, por ofrecer las redes una garantía de conectividad del 99.999%) o el mínimo BER ofrecido.

Como se ha visto en la sección anterior, algunos de los parámetros típicos de las SLAs no pueden ser medidos en cualquier punto de la red al requerir información digital, que sólo está disponible en las terminaciones de las conexiones, es decir, después de las conversiones opto-eléctricas. Por ello, el testbed ADRENALINE integra un contrato de servicio orientado a redes todo ópticas, que puede

ser verificado con un sistema de monitorización no intrusivo como INIM. Esta SLA contempla tres servicios, inspirados en los requerimientos de la voz sobre IP (*VoIP-like*), la televisión sobre IP (*IPTV-like*) y los datos (*Internet+*). La siguiente tabla resume los parámetros y valores considerados en el testbed ADRENALINE:

SLA parameter		Lambda service class		
QoS block	QoS parameter	VoIP-like	IPTV-like	Internet+
Service-intrinsic	Setup delay	< 1 sec	< 10 sec	< 1.5 min
	Availability (BP)	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Throughput	Up to maximum laser bit rate		
	Packet delay/ α	< 50msec	< 500msec	< 5sec
	Packet loss	10^{-2}	10^{-3}	10^{-1}
	Physical (OSNR)	$OSNR_{targetBER} + \Delta OSNR_{BERest}$		

donde α es el factor de latencia extremo a extremo requerida ($\alpha \leq 1$), que se determina en la fase de negociación de la SLA, $OSNR_{targetBER}$ es el nivel de OSNR mínimo necesario para asegurar un umbral de BER determinado (*targetBER*) y $\Delta OSNR_{targetBER}$ es un parámetro empírico utilizado para ajustar la precisión de la estimación de BER mediante la monitorización en tiempo real de OSNR [26].

4. ADRENALINE+

Las redes de transporte ópticas transparentes que ofrecen conmutación de circuitos (lambdas) reconfigurables presentan un conjunto de restricciones o carencias que requieren de un gran esfuerzo en I+D:

- La reconfigurabilidad y la inexistencia de conversiones electro-ópticas en redes transparentes implica un aumento de la tasa de error por bit (BER) de los canales ópticos, debido a la degradación de la señal óptica sufrida en una conexión de extremo a extremo entre un par origen-destino al atravesar múltiples enlaces y componentes ópticos. Por consiguiente, la monitorización de la capa física será un elemento indispensable, teniendo una doble vertiente: conocer el estado de los canales activos, tanto para garantizar calidad de servicio como para protección/restauración, y utilizar la información del estado de los recursos ópticos para aprovisionar nuevos canales mediante el plano de control GMPLS.
- La granularidad del ancho de banda que suministran estas redes es una longitud de onda DWDM (lambda), es decir, se asigna toda una lambda tanto si se solicita un ancho de banda de 10 Gb/s como de 100 Mb/s. Para evitar este desaprovechamiento del ancho de banda, es necesario que la red pueda ofrecer una granularidad inferior, de tal forma que se puedan agrupar flujos provenientes de diferentes clientes, y así ser transportados sobre una única lambda. Esto implica dotar al nodo óptico con otro nivel de conmutación, de tal forma que el plano de control GMPLS pueda gestionar, de forma integrada, ambas tecnologías de conmutación. Existen

diferentes tecnologías que permiten agrupar y gestionar de forma eficaz diferentes flujos, tal como SDH/SONET utilizando GFP, VCAT y LCAS. En nuestro caso hemos decidido optar por Ethernet. Esta tecnología nació en entornos de redes de área local, siendo la tecnología predominante, y actualmente está migrando hacia redes de área extendida con velocidades de 10Gb/s y 100Gb/s (en estandarización).

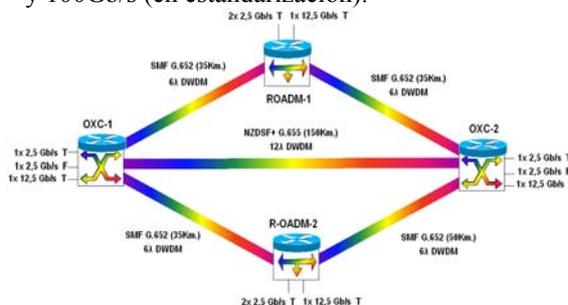


Figura 14. Arquitectura ADRENALINE+

Para paliar estas restricciones y partiendo de la experiencia adquirida en el testbed ADRENALINE, se ha definido la fase 2 de ADRENALINE testbed denominada ADRENALINE+, que abordará las citadas restricciones. Las mejoras que se abordarán en ADRENALINE+ permitirán migrar de una red metropolitana en anillo, con tres nodos ópticos R-OADM explicado en sección 2.1, a una topología troncal mallada (formada por 4 nodos: 2 nodos R-OADMs y 2 nuevos nodos OXCs reconfigurables). También se introducirán en el testbed nuevos transceptores con láser sintonizable a la velocidad de 12,5Gb/s, y se trabajará con un nuevo enlace óptico (G.655) con una capacidad de hasta 16 canales DWDM por fibra separados 50GHz. Hasta ahora el testbed ADRENALINE solamente consta de fibra estándar monomodo (G.652), y con la mejora del testbed se introducirán 300Km de fibra NZDSF+ para un enlace de 150km que unirá los dos nodos OXCs. Asimismo se abordarán técnicas para la compensación de la dispersión cromática y la regeneración (2R y 3R) de la señal, con el fin de minimizar o paliar los efectos de las degradaciones de la señal óptica. Por último, un conmutador Ethernet con 4 puertos de 10GigE, 21 puertos de 1 GigE y 48 puertos de 10/100/1000 Base-T será el encargado de gestionar la agregación de flujos de datos.

5. Conclusiones

En este artículo se ha presentado la arquitectura del testbed ADRENALINE, una red de transporte óptica inteligente mediante un plano de control GMPLS desarrollada por el CTTC. Además se ha repasado los principales experimentos realizados, así como una breve descripción de la evolución del testbed (fase 2) que se ha iniciado a mediados del 2006. Por último, sólo remarcar que parte de las actividades desarrolladas en ADRENALINE testbed están enmarcadas dentro de proyectos de I+D nacionales y Europeos, en los que se ha contribuido activamente

dentro del consorcio, tales como: EMPIRICO, ITEA EUREKA TBONES, ITEA CELTIC PROMISE, IST IP NOBEL, IST IP NOBEL2, IST NoE E-Photon/One+ y MEC RESPLANDOR.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el **Ministerio de Educación y Ciencia** (MEC) mediante el proyecto **RESPLANDOR** bajo el contrato **TEC2006-12910/TCM**.

Referencias

[1] B. Mukherjee, "WDM Optical Communication Networks. Progress and Challenges", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 18, no. 10, 2000.

[2] D. Cavendish, "Evolution of Optical Transport Technologies: From SONET/SDH to WDM", IEEE Communications Magazine, vol. 38, no. 6, pp. 164-172, Junio 2000.

[3] S. S. Dixit, "IP Over WDM: Building the Next Generation Optical Internet", NJ (USA), Wiley-Interscience, 2003.

[4] E. Mannie Ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) Architecture," IETF RFC 3945, Octubre 2004.

[5] K. Kompella and Y. Rekhter, "OSPF extensions in support of Generalized Multi-Protocol Label Switching", IETF RFC 4203, Octubre 2005.

[6] L. Beger Ed., "Generalized Multi-Protocol Label Switching (GMPLS) signaling functional description", IETF RFC 3471, Enero 2003.

[7] R. Muñoz, et. al "The ADRENALINE Test Bed: Integrating GMPLS, XML and SNMP in transparent DWDM networks," in IEEE Comm. Mag., Agosto 2005.

[8] "802.1q: Virtual LANs", IEEE 802.1Q Working Group, IEEE, 2001.

[9] D. Farinacci, et. al., "Generic Routing Encapsulation (GRE)", IETF RFC 2784, Marzo 2000.

[10] NISTNet Emulator, accessible online en: <http://www-x.antd.nist.gov/nistnet/>

[11] F. Galán, et al., "Demo of ADNETCONF: ADRENALINE's tool for dynamic configuration of GMPLS-based all optical transport networks", TridentCom 2006, Barcelona, Marzo 2006.

[12] F. Galán, R. Muñoz, "Method for Logical Deployment, Undeployment and Monitoring of a Target IP Network", PCT/EP2006/009960, Octubre 2006 (solicitud de patente).

[13] R. Muñoz, et al., Experimental demonstration of two new GMPLS lightpath setup schemes for soft-permanent connections over Metro-DWDM DPRing implemented on EMPIRICO ASON testbed, IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom 2004). Dallas (USA), 29 Noviembre - 3 Diciembre 2004

[14] L. Shen et. Al., "Provisioning and restoration in the next-generation optical core", SPIE Opt. Netw. Mag., vol. 4, (2), pp. 32-45, Marzo/Abril 2003.

[15] R. Martínez, et al., "Experimental GMPLS-based Dynamic Routing in All-Optical wavelength-routed networks", in Proc. of IEEE ICTON 2005. Barcelona (Spain), Julio 2005.

[16] R. Martínez, et al., "Dynamic GMPLS-based Establishment of Bidirectional Connections in All-Optical Networks", in Proc. IEEE INFOCOM 2006 High-Speed Networking Workshop. Barcelona (Spain), April 24 2006.

[17] J. Strand, et al., "Issues for routing in the optical layer", IEEE Com. Mag., vol. 39, no. 2, 2001, pp. 81-87.

[18] R. Martínez et. al., "Challenges and requirements for introducing impairment-awareness into the management and control planes of ASON/GMPLS WDM networks", accepted for IEEE Commun. Mag., special issue in advances in control and management of connection-oriented networks, Diciembre. 2006.

[19] R. Muñoz, et al., Flooding global wavelength information through GMPLS RSVP-TE signaling in DPRings, IEEE International Conference on Communications (ICC 2005). Seoul (Korea), Mayo 2005.

[20] R. Muñoz, et al., "An Efficient Control-Channel Multi-Failure Management Mechanism in GMPLS-based optical Networks" Accepted for publication in the OSA Journal of Optical Networking (JON) in November 2006.

[21] R. Muñoz, et al. "Experimental GMPLS fault management for OULSR transport networks", OFC 2005.

[22] R. Muñoz, et al. "Experimental in-fiber GMPLS fault management for 1:1 OUPSR R-OADM networks", 31 ECOC, Glasgow, Septiembre 2005.

[23] ITU-T Recommendation G.8080, "Architecture for the Automatically Switched Optical Network (ASON)", Noviembre 2001.

[24] C. Pinart, et al., "Integration of peer-to-peer strategies and SOAP/XML for inter-domain, user-driven provisioning in an ASON/GMPLS network", OSA Journal of Optical Networking, Vol. 5, Nb. 4, pp. 246-262, 2006.

[25] C. Pinart, et al., "On managing optical services in future control plane enabled IP/WDM networks", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 23, Nb. 10, pp. 2868-2876, Octubre 2005.

[26] C. Pinart, et al. "The INIM system: in-service non-intrusive monitoring for QoS enabled transparent WDM", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 12, Nb. 4, pp. 635-644, Julio-Agosto 2006.